УДК 615.47:16-073

Г.Л. Логунова
Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «ИСКРА»
МОН Украины, г. Луганск
official@iskra lugansk.ua

Анализ основных показателей медицинских гамма-камер

В статье рассмотрены основные показатели, характеризующие уровень качества гамма-камер для их последующего учета при формировании технических требований, предъявляемых к образцам разрабатываемой аппаратуры. Определены особенности осуществления контроля характеристик гамма-камер, выполнена оценка уровня параметров на примере представительских образцов.

Введение

Одним из наиболее информативных, качественных и эффективных методов медицинской диагностики считается радионуклидная диагностика в сочетании с рентгеновской компьютерной томографией. Современная аппаратура радиоизотопных методов диагностики относится к сложным техническим системам, создание которых охватывает широкую мультидисциплинарную область исследований, включающую физику, медицину, электронику, математический аппарат обработки данных, точную механику.

Основными инструментами радионуклидной диагностики являются позитронно-эмиссионный компьютерный томограф (PET) и однофотонный эмиссионный компьютерный томограф (SPECT) на основе гамма-камеры. В составе томографа, в зависимости от диагностической методики, может быть один или два-три детектора с изменяемым углом между ними. Детектор медицинской томографической гамма-камеры имеет в своей основе крупногабаритный сцинтилляционный кристалл. Наличие в Украине производства таких кристаллов [1] создает условия для создания отечественной медицинской томографической аппаратуры, что особенно актуально в условиях высокой стоимости продукции ведущих фирм, таких как «Сименс», «Филипс», «Дженерал Электрикс», которая достигает 1 млн долл. и более.

Опыт, который имеет НИПКИ «Искра» в области систем гамма-видения, является основой для создания нового типа диагностической аппаратуры с кодированной апертурой и коллиматором повышенной прозрачности, не только не уступающей существующим гамма-камерам по техническим характеристикам, но и превосходящей их по чувствительности и ряду иных параметров [2-5].

Целью настоящей работы является определение основных показателей, характеризующих уровень качества гамма-камер для их последующего учета при формировании технических требований, предъявляемых к образцам разрабатываемой аппаратуры.

Задача состоит в анализе требований, предъявляемых к контролю характеристик гамма-камер, и особенностей осуществления контроля, а также в оценке величины параметров на примере представительских образцов.

Показатели, характеризующие уровень качества гамма-камер

Основным требованием, которое установлено МАГАТЭ в целях обеспечения безопасности диагностического процесса в ядерной медицине, является приемлемое качество изображения с минимальной дозой для пациента [6].

Гамма-камеры характеризуются базовыми показателями, определяющими технический уровень данного вида изделий. Все характеристики гамма-камеры можно разделить на системные и собственные. Системные характеристики измеряются для гамма-камеры вместе с коллиматором, при этом значения характеристик для различных коллиматоров существенно различаются. Поскольку гамма-камеры снабжены несколькими сменными коллиматорами, наряду с системными рассматривают собственные характеристики гамма-камер, измеряемые без коллиматора. Определение и методы измерения системных и собственных характеристик гамма-камер установлены стандартами IEC, которые внедрены в России, как идентичные этим IEC стандарты ГОСТ Р МЭК [7], [8]:

– IEC 60789 Characteristics and test conditions of radionuclide imaging devices; Anger type gamma cameras (ГОСТ Р МЭК 60789-99 Характеристики и методы испытаний радионуклидных визуализирующих устройств гамма-камер типа Ангера);

– IEC 61675-3 Radionuclide imaging devices. Characteristics and test conditions. Part 3. Gamma camera based wholebody imaging systems (ГОСТ Р МЭК 61675-3-2006 Устройства визуализации радионуклидные. Характеристики и условия испытаний. Часть 3. Системы визуализации всего тела на базе гамма-камеры.).

В США требования в этой области регламентируются стандартом американского периодического издания по ядерной физике и технике Национальной ассоциации владельцев электротехнических предприятий (NEMA) Standards Publication NU 1-2001 «Performance Measurements of Scintillation Cameras» [9].

Основные требования NEMA совпадают с требованиями IEC 60789, однако IEC дополнительно предусмотрено определение таких характеристик, как: собственная неоднородность чувствительности; собственная неоднородность чувствительности к точечному источнику, собственное энергетическое разрешение, а также проверка работы гамма-камеры в режиме пространственной регистрации множественного окна.

Согласно требованиям МАГАТЭ [6] использование гамма-камер и иного оборудования ядерной медицины должно осуществляться в соответствии со стандартами МЭК или с национально признанными в государстве аналогичными стандартами. Производители гамма-камер проводят испытания и приводят технические характеристики в соответствие к стандартам IEC и NEMA.

К основным контролируемым характеристикам, на основании которых производятся оценка и сравнение качества томографических систем, относятся: пространственное разрешение; пространственные искажения (нелинейность); чувствительность; неоднородность чувствительности; энергетическое разрешение; характеристика скорости счета (быстродействие).

Рассмотрим методы оценки этих характеристик, установленные стандартами IEC [7]. Для проведения измерений необходимы специальные технические средства и программное обеспечение.

Пространственное разрешение томографа характеризует способность концентрировать в точку распределение плотности отсчетов на изображении точечного источника [8]. Для гамма-камеры пространственное разрешение определяется значением ширины функ-

ции отклика линейного источника [7]. В качестве критерия оценки пространственного разрешения принято значение полной ширины на полувысоте функции отклика линейного источника (FWHM, рис. 1). В точках А и В интерполированная кривая скорости счета пересекает линию, соответствующую 0,5 максимального значения. Как дополнительная характеристика пространственного разрешения используется полная ширина на 0,1 высоты той же функции.

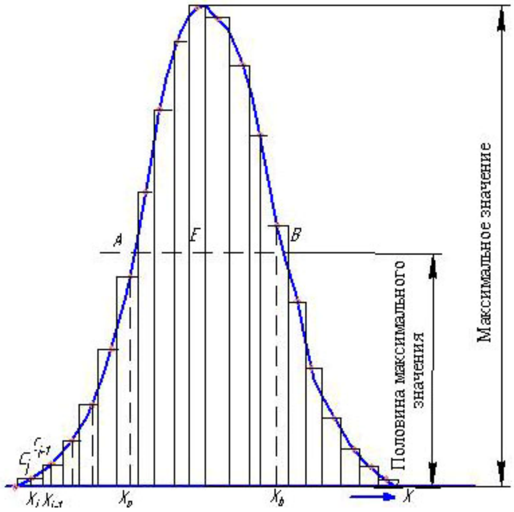
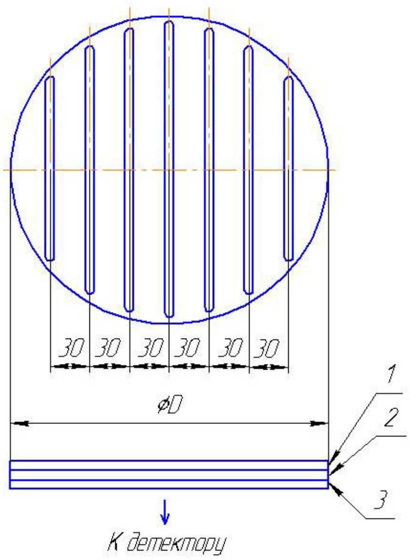


Рисунок 1 – Измерение полной ширины на уровне половины максимума

Измерения системного пространственного разрешения проводят с помощью линейных источников, которые представляют собой заполненную радионуклидом трубку внутренним диаметром 1 мм и длиной, приблизительно равной ширине поля зрения детектора. Трубку располагают так, чтобы ее ось была перпендикулярна к оси коллиматора и параллельна одной из электронных осей (X, У). Значение измеряемой величины должно быть просуммировано с площадок длиной не менее 30 мм и шириной, равной или менее 10% полной ширины на уровне половины максимума изображения источника, параллельных линейному источнику. Протяженность площадок в направлении, перпендикулярном к источнику, должна ограничиваться точкой, в которой значение измеренной величины составляет 1% ее максимального значения, или верхней границей поля зрения детектора. Измеряемое число импульсов при максимальном значении функции расширения линии должно быть не менее 10^4 на расстоянии 50, 100 и 150 мм от коллиматора. Наибольшее полученное среднее значение ширины линии распределения принимают за величину собственного пространственного разрешения.

Измерения собственного пространственного разрешения [7] проводят с помощью специального линейного фантома (рис. 2). Диаметр фантома D должен быть больше, чем поле зрения детектора исследуемой гамма-камеры. Производят накопление двух изображений для положения полос (щелей) фантома по осям X и У. Затем полученное изображение разбивают на полосы, равные 30 мм, и для каждой выделенной полосы вычисляют среднее значение ширины линии распределения и наибольшее полученное значение принимают за величину собственного пространственного разрешения.

Пространственная нелинейность характеризует искажения изображения линейного источника. Для количественной оценки нелинейности используется величина максимального отклонения реального изображения (выраженная в мм) от идеального изображения прямой линии линейного источника [7]. При этом идеальная линия рассчитывается методом наименьших квадратов по пикам распределения изображения линейного источника.



1 – алюминиевый сплав 3 мм; 2 – свинец 3 мм; 3 – алюминиевый сплав 0,5 мм

Рисунок 2 – Щелевой фантом для измерения собственного разрешения и пространственной нелинейности

Определение собственной пространственной нелинейности производится при измерении собственного пространственного разрешения. Получают две группы данных: одну – со щелями, параллельными оси X; другую – со щелями, параллельными оси У. Дифференциальную линейность поля зрения детектора находят как стандартное отклонение всех измеренных расстояний, получаемых от двух групп данных. Абсолютную линейность определяют методом наименьших квадратов, при обработке изображений равнорасположенных параллельных линий в каждой из двух групп данных отдельно. Абсолютную линейность рассчитывают как наибольшее значение отклонений по осям X и У в миллиметрах между наблюдаемой и рассчитанной линиями в поле зрения детектора.

Системная чувствительность определяет эффективность регистрации гамма-излучения для различных коллиматоров и радионуклидов. Выражается отношением скорости счета к активности плоского источника с радионуклидом [7]. Измеряется с помощью специального фантома из полметилакрилата по IEC 60789 (рис. 3), расположенного на поверхности коллиматора перпендикулярно к его оси. Системная чувствительность количественно определяется в импульсах в секунду, отнесенных к единице активности (имп/с/Бк).

Неоднородность чувствительности измеряется после проведения предварительного анализа изображения для исключения влияния краевых эффектов [7]. При этом все краевые пикселы, содержащие менее 75% среднего числа импульсов, приравнивают к нулю. Те краевые пикселы, которые имеют один из четырех примыкающих к нему соседних пикселов, содержащих нулевое число импульсов, исключают из анализа и приравнивают к нулю. Остальную информацию (ненулевые пиксели, выявляемые при облучении детектора однородным потоком) сглаживают по девяти точкам со следующими весами:

$$\begin{matrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{matrix}$$

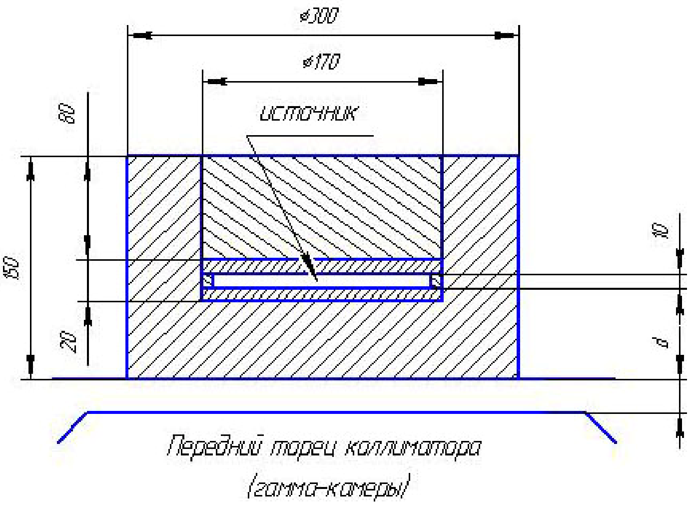


Рисунок 3 – Цилиндрический фантом для измерения системной чувствительности и скорости счета

В тех случаях, когда пиксел с ненулевым значением вводят в процесс сглаживания, коэффициент нормализации должен быть соответственно изменен [7].

Неоднородность чувствительности по полю зрения гамма-камеры определяется в виде обобщенной (интегральной) оценки неоднородности, и в виде локальной (дифференциальной) оценки.

Интегральная неоднородность характеризует диапазон максимальных вариаций чувствительности в пределах поля зрения гамма-камеры и определяется следующим образом [10]:

$$N = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{N_{\max} + N_{\min}} \times 100\% ,$$

где N_{max} и N_{min} – максимальное и минимальное число отсчетов в элементе изображения для матрицы сбора 64×64 соответственно.

Дифференциальная неоднородность характеризует максимальную скорость изменения чувствительности на небольшом, заранее определенном, участке в пределах поля зрения и определяется по аналогичной формуле. При этом за $N_{\max}$ и $N_{\min}$ принимается максимальное и минимальное значение накопления в 5 соседних элементах изображения. Расчет ведется для всех возможных горизонтальных и вертикальных групп из 5 элементов изображения. За величину собственной дифференциальной неоднородности принимают максимальное значение N, полученное для всех возможных групп.

Измерения собственной неоднородности проводят без коллиматора. При этом однородная засветка поля зрения создается с помощью точечного источника ^{99m}Tc или ^{57}Co, расположенного на расстоянии пятикратного максимального размера поля зрения детектора от поверхности кристалла блока детектирования.

Измерения системной неоднородности с коллиматором проводят с помощью однородного источника гамма-излучения (как правило, заливной однородный источник с изотопом ^{99m}Tc), который устанавливается непосредственно на поверхности коллиматора. Сбор изображения однородного источника проводят в матрице 64×64, при этом общее накопление должно быть не менее 25 000 000 отсчетов.

Энергетическое разрешение – характеристика спектрометрических свойств детектора. В соответствии с [7] определяется без коллиматора при однородной засветке поля зрения с помощью точечного источника ^{99m}Tc или ^{57}Co, расположенного на расстоянии

пятикратного максимального размера поля зрения детектора от поверхности кристалла блока детектирования. Дискретизация амплитудного канала анализатора, прокалиброванного по энергии гамма-излучения, должна быть не хуже 5% от полной ширины на половине высоты фотопика, накопление в пике не менее 10 000 отсчетов. За величину энергетического разрешения принимается полная ширина на половине высоты фотопика, выраженная в процентах от значения энергии фотопика данного радионуклида.

Характеристики скорости счета являются показателями быстродействия гамма-камеры. Для их определения используют цилиндрический фантом (рис. 3). В соответствии с требованиями [7] необходимо построить график зависимости наблюдаемой скорости счета от истинной скорости счета при изменяющейся активности источника для радионуклида ^{99m}Tc, а при необходимости дополнительно можно построить график для одного из радионуклидов с энергией, значение которой находится между 300 и 400 кэВ. Из графика определяют значение измеряемой скорости счета, которая составляет 80% истинной скорости счета.

Для того чтобы продемонстрировать смещенные по месту нахождения события, также необходимо получение изображения источника с профилями вдоль осей X и У, проходящими через центр источника: два профиля при измеренной скорости счета, равной примерно 5000 имп./с, два – при скорости 20000 имп./с и два – при максимальной измеряемой скорости счета.

Рассмотрим технические характеристики представительских образцов томографов на базе гамма-камер планарной сцинтиграфии (табл. 1).

Таблица 1 – Технические характеристики

Наименование параметра		E.CAM	Nucline X-Ring	«ЭФАТОМ»	ОФЭКТ-2
Размер поля зрения, мм		533×387	530×390	546×405	520×395
Собственное пространственное разрешение детектора по уровню 0,5 (FWHM), мм	В центральном поле зрения (CFOV)	3,8	3,6	3,4	3,8
	В полезном поле зрения (UFOV)	3,9	3,7	3,4	3,9
Системное пространственное разрешение детектора с низкоэнергетическим коллиматором высокого разрешения по уровню 0,5 (FWHM), мм		7,4	7,3	6,5	6,8
Собственная интегральная неоднородность изображения, не более, %	В центральном поле зрения	2,9	2,4	1,8	1,7
	В полезном поле зрения	3,7	2,9	2,4	2,4
Собственная дифференциальная неоднородность изображения, не более, %	В центральном поле зрения	2,5	1,9	1,4	1,5
	В полезном поле зрения	2,7	2,4	1,9	2,0
Собственная абсолютная нелинейность изображения, мм	В центральном поле зрения	0,4	0,38	0,31	0,2
	В полезном поле зрения	0,7	0,40	0,31	0,25
Собственная дифференциальная нелинейность изображения, не более, мм	В центральном поле зрения	0,2	0,18	0,15	0,15
	В полезном поле зрения	0,2	0,20	0,15	0,2
Системная чувствительность с низкоэнергетическим коллиматором высокого разрешения, имп./мин./мкКи		225	160	нет данных	нет данных

В качестве представительских образцов была выбрана аппаратура, которая выпускается в настоящее время и имеет высокие технические характеристики: система E.CAM с цифровым детектором высокого разрешения (Siemens medical) [11]; цифровая гамма-камера с одним прямоугольным детектором Nucline X-Ring (Mediso Medical Imaging Systems) [12]; двухдетекторный однофотонный эмиссионный компьютерный томограф «ЭФАТОМ» (НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург) [13]; томографическая гамма-камера ОФЭКТ-2 ТУ У 33.1-23756522-048:2009 (Институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков) [14].

Выводы

На основе проведенного анализа основных показателей, характеризующих уровень качества гамма-камер, и оценки величины параметров на примере представительских образцов установлено, что:

– уровень лучевой нагрузки на организм пациента зависит от активности используемого радиофармпрепарата, и, таким образом, от величины чувствительности, которая определяет эффективность регистрации гамма-излучения;

– системная чувствительность представительских образцов находится на уровне 160 – 225 имп./мин./мкКи;

– при этом системное пространственное разрешение – 6,5 – 7,4 мм.

Эти параметры обеспечивают получение изображения с качеством, необходимым для проведения радионуклидной диагностики, при безопасной для пациента минимальной дозе облучения.

Таким образом, чтобы обеспечить разрабатываемым гамма-камерам конкурентоспособность на отечественном и мировом рынке, они должны обладать значением вышеприведенных технических характеристик не ниже, чем у представительских образцов, но при более низкой стоимости.

Учитывая европейские интеграционные процессы, и то, что рынком для создаваемой аппаратуры, кроме Украины, может быть и Россия, при разработке медицинской томографической аппаратуры можно опираться на IEC 60789, принятый в России в качестве национального стандарта.

Литература

1. Национальная академия наук Украины. Институт сцинтилляционных материалов. Производство. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://isma.kharkov.ua/
2. Войлов Ю.Г. Системы гамма-видения / Войлов Ю.Г. – Луганск : Восточно-украинский нац. университет, 1999 – 280 с.
3. Плахотник В.Ю. Исследование характеристик пространственных распределений вычисленных координат сцинтилляций в позиционно-чувствительном детекторе типа гамма-камеры / В.Ю. Плахотник // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». – Донецьк : ДонНТУ, 2004. – Випуск 74. – С. 272- 286.
4. Плахотник В.Ю. Разработка физической схемы системы гамма-видения с кодированной апертурой и оценка некоторых её характеристик» / В.Ю. Плахотник // «ПРАЦІ», Луганське відділення Міжнародної Академії інформації. – 2007. – № 1 (14). – С.124-126.
5. НИПКИ «Искра». Гамма-томограф [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.iskra.lugansk.ua/index.php?lang=ru&page=sci-tech-prod/gamma.
6. Серия норм МАГАТЭ по безопасности. Радиологическая защита при медицинском облучении ионизирующим излучением. STI/PUB/1117: МАГАТЭ, ВЕНА – 2004. – 99 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www-pub.iaea.org/ MTCD/publications/ PDF/ Pub1117r_web.pdf
7. Характеристики и методы испытаний радионуклидных визуализирующих устройств гамма-камер типа Ангера : ГОСТ Р МЭК 60789-99. – М : ИПК Издательство стандартов, 2000. – 12 с.

8. Устройства визуализации радионуклидные. Характеристики и условия испытаний. Часть 2. Однофотонные эмиссионные компьютерные томографы : ГОСТ Р МЭК 61675-2-2006. – М. : ФГУП Стандартинформ, 2006. – 18 с.
9. NEMA Standards Publication NU 1-2001 «Performance Measurements of Scintillation Cameras» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.nema.org/stds/nu1.cfm.
10. Калантаров К.Д.. Аппаратура и методики радионуклидной диагностики в медицине / [К.Д. Калантаров, С.Д. Калашников, В.А. Костылев и др.]; под ред. В.А. Викторова. – М. : ЗАО «ВНИИМП-ВИТА», 2002. – 121 с.
11. e.cam Signature Series. All About Quality, Speed and Comfort. siemens medical [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.medical.siemens.com/siemens/it_IT/gg_nm_FBAs/images/ product_images/ e.cam_signatureSeries_Single/ecam_brochure.pdf
12. Nucline X-Ring/R Technical Specifications [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.mediso.com/products/universal-line/x-ringr/technical-specifications.html
13. Арлычев М.А. Двухдетекторный однофотонный эмиссионный компьютерный томограф «ЭФАТОМ» / М.А. Арлычев, В.Л. Новиков, А.В. Сидоров [и др.] // Журнал технической физики. – 2009. – Вып. 10. – Т. 79. – С. 138-146.
14. Педаш В.Ю. О системах визуализации в радионуклидной диагностике. Разработка и испытания двухдетекторной гамма-камеры общего назначения / Педаш В.Ю., Ольшевский А.Г., Гринев Б.В., Гектин А.В. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://dubna.rosoez.ru/upload/dubna/files/prezentacii/pedash.pdf

Г.Л. Логунова
Аналіз основних показників медичних гамма-камер
Розглянуто основні показники, які характеризують рівень якості гамма-камер, для їх подальшого урахування при формуванні технічних вимог, що висуваються до зразків розроблюваної апаратури. Визначено особливості здійснення контролю характеристик гамма-камер, виконано оцінку рівня параметрів за прикладом представницьких зразків.

G.L. Logunova
The Analysis of the Main Parameters of Medical Gamma Cameras
The article describes the main parameters, which characterize a quality level of gamma cameras, for the further accounting at product definition regarding the samples of instrumentation being developed. Peculiarities of the monitoring of gamma camera characteristics were defined, estimation of parameter levels were performed by the example of representative samples.

Статья поступила в редакцию 14.06.2010.